

ОПТИМІЗАЦІЯ КОНСТРУКЦІЇ І ПРОГНОЗУВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ОЧИЩЕННЯ ЦИКЛОНУ ІЗ СПІРАЛЬНИМ НАПРАВЛЯЮЧИМ АПАРАТОМ

© Майструк В. В., Гаврилів Р. І., 2019

<https://doi.org/10.23939/istcipa2019.53.036>

Мета. Поставлену проблему в науково-дослідній роботі можна вирішити за допомогою комп'ютерного моделювання руху газопилових потоків у робочій зоні циклону за допомогою CFD-програм. Знання структури газового потоку і, відповідно, траєкторії руху частинок пилу, дасть можливість оцінити ефективність його роботи й оптимізувати його конструкції. **Актуальність** роботи полягає у визначенні ефективності роботи пиловловлюючих апаратів за допомогою CFD-програм. Експерименти, які проведено за допомогою CFD-програм, значно пришвидшують процес досліджень і є набагато дешевшими. **Методика** полягає в тому, що на основі обчисленої структури газового потоку досліджуваного апарату, визначається траєкторія руху певної кількості частинок однієї фракції залежно від умов входу в апарат. Частинки, траєкторія яких за розрахунками досягла стінок циліндричної або конічної частини корпусу апарату вважаються “вловленими”. Частинки, траєкторія яких за розрахунками досягає верхнього торця випускної труби, вважають “винесеними”. По співвідношенню “вловлених” і “винесених” частинок визначають фракційну ефективність апарату. **Результати.** Оптимізовано конструкцію циклону із спіральним направляючим апаратом і визначено ефективність його роботи. **Наукова новизна.** Вперше запропоновано визначати ефективність роботи пиловловлюючих апаратів за обчисленими за допомогою CFD-програм траєкторіями руху частинок залежно від умов входу в апарат. **Практична значущість.** За допомогою CFD-програм, знаючи вид пилу, який надходитиме в пиловловлюючий апарат і його гранулометричний склад, можна прогнозувати ефективність очищення і, відповідно, оптимізувати конструкцію пиловловлюючих апаратів сухого очищення. Результати досліджень можна широко застосовувати для створення високоефективного пиловловлюючого обладнання.

Ключові слова: циклон, спіральний направляючий апарат, ефективність очищення, CFD-програми.

Вступ. В металообробці часто використовують процеси, які супроводжуються виділенням значної кількості пилу (шліфування, полірування та ін.). Під час механічної обробки матеріалів джерелами утворення і виділення пилу в атмосферу є різноманітні металорізальні і абразивні верстати. Основу більшості виробничих процесів обробки матеріалів у механічних цехах становлять процеси різання, в яких під час обробки таких матеріалів, як чавун, бронза, сталь, текстоліт, склопластик і інші виділяються не тільки стружка, але і достатньо дрібні пилові частинки розміром від декількох до сотень мікрметрів. Необхідно зазначити, що інтенсивність пилоутворення залежить від цілої низки технологічних факторів: швидкості різання, величини подачі ріжучого інструмента й оброблюваних виробів, а також складу матеріалу, з якого ці вироби виготовлено. Так, під час обробки сірого чавуну різцями збільшення швидкості утричі приводить до зростання концентрації пилу майже в 4,5 разу, а під час обробки олов'янистої бронзи збільшення швидкості в 4 рази спричиняє зростання концентрації пилу в 5,3 разу. Разом з тим під час обробки чавуну в пилу збільшується вміст частинок розміром до 5 мкм, тоді як у випадку із бронзою він зменшується. Під час обробки сталі Ст 45 із збільшенням швидкості різання концентрація пилу збільшується незначно, але різко зростає утворення частинок пилу розміром 2 мкм (до 75 %) [1].

У процесі заточування інструменту утворюється пил, дисперсний склад якого характеризується медіанним діаметром $d_{50}=15-30$ мкм [1].

Під час обробки склопластику найбільша концентрація виникає в процесі обдирання, найменша – під час фрезерування. Дисперсний склад пилу характеризується медіанним діаметром $d_{50}=15-40$ мкм [1].

Частинки графіту і вугілля, які отримуються в результаті обробки виробів з графіту і вугілля мають середні розміри 20–100 мкм з широким спектром розподілу для різних процесів різання.

Вищенаведені факти свідчать про те, що для забезпечення санітарних вимог на робочому місці, необхідно повітря з частинками пилу із зони обробки видаляти і очищати.

Аналіз літературних джерел за темою статті. Пилоочисні установки, які широко використовуються в галузі механічної обробки, не завжди відповідають поставленим вимогам до ефективності очищення. Тому постає питання створення нових ефективних пилоочисних апаратів. Існує багато праць, які присвячені розробкам нових ефективних пилоочисних апаратів. Так, у праці [2] розроблено пиловловлюючий апарат, в якому в системі каналів утворюється динамічний газопиловий шар, який є фільтром для частинок, що знову надходять на очищення газу і приводить до збільшення ефективності роботи. В праці [3] проведено чисельний розрахунок часу перебування та довжини шляху для твердих частинок в середині апарату за допомогою CFD-програм.

Однак однією із основних проблем під час проектування нових пилоочисних апаратів є відсутність надійних методів прогнозування ефективності очищення. Існуючі лабораторні методи є надзвичайно трудомісткими та економічно недоцільними. Останнім часом істотно розширилися можливості числового аналізу завдяки CFD-програмам (Computational Fluid Dynamics), що призначені для комп'ютерного аналізу задач гідро- і газодинаміки.

Мета. Поставлену проблему в науково-дослідній роботі можна вирішити за допомогою комп'ютерного моделювання руху газопилових потоків у робочій зоні циклону за допомогою CFD-програм. Знання структури газового потоку і, відповідно, траєкторії руху частинок пилу, дасть можливість оцінити ефективність його роботи і провести оптимізацію його конструкції. Експерименти, які проведені за допомогою CFD-програм, значно пришвидшують процес досліджень і є набагато дешевшими.

Методика проведення досліджень. Суть методу за визначенням ефективності роботи пиловловлюючих апаратів за допомогою CFD-програм полягає в тому, що на основі обчисленої структури газового потоку досліджуваного апарату визначається траєкторія руху певної кількості частинок однієї фракції залежно від умов входу в апарат. Частинки, траєкторія яких за розрахунками досягла стінок циліндричної або конічної частини корпусу апарату, вважають “вловленими”. Частинки, траєкторія яких по розрахунках досягає верхнього торця випускної труби, вважаються “винесеними”. За співвідношенням “вловлених” і “винесених” частинок визначають коефіцієнт ефективності кожної фракції.

Під час використання цієї методики було прийнято ряд допущень:

- а) частинки не впливають одна на одну;
- б) коли частинки досягають стінки корпусу апарату, вони не можуть бути знову винесені газовим потоком;
- в) всі частинки сферичної форми.

Знаючи фракційні коефіцієнти, повний коефіцієнт ефективності очищення апарату можна визначити за залежністю [1]:

$$\eta_0 = \frac{\eta_1 M_1}{100} + \frac{\eta_2 M_2}{100} + \dots + \frac{\eta_n M_n}{100}, \quad (1)$$

де $\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n$ – фракційні коефіцієнти ефективності очищення пиловловлюючого апарату; M_1, M_2, \dots, M_n – масова частка кожної фракції пилу.

Гідравлічний опір апарату визначали за різницею повних тисків до і після пиловловлювача.

Визначали ефективність очищення за допомогою CFD-програм на моделі циклону із спіральним напрямним апаратом, наведеним у [4]. За методикою, наведеною в [5], досліджували структуру газового потоку в апараті.

Вихідними параметрами для дослідження даних циклонів були характеристики пилопо-вітряного потоку:

- атмосферний тиск за нормальних умов $P_0=101325$ Па;
- температура середовища за нормальних умов $T_0=293$ К;
- густина повітря $\rho_{\text{пов}} = 1,293 \text{ кг/м}^3$;
- пил – кварцове скло, густина $\rho_{\text{пил}} = 2200 \text{ кг/м}^3$;
- фракційний склад пилу: 0–1 мкм – 5 %; 1–3 мкм – 14 %; 3–5 мкм – 16 %; 5–6 мкм – 5,5 %; 6–8 мкм – 9,5 %; 8–10 мкм – 8 %; 10–12 мкм – 4 %; більше 12 мкм – 38 %.

Фракційний склад пилу відповідав складу пилу КП – 3, для якого медіанний діаметр частинок становить 8 мкм і який використовується як стандартний для порівняльних випробувань пиловловлюючих апаратів інерційного типу [6].

Для розрахунку задавали такі граничні умови:

- відкритий потік – об'ємні витрати на вході або виході (витрати відповідали фіктивній швидкості 4 м/с);
- відкритий тиск – тиск навколишнього середовища;
- стіна – реальна стінка.

Необхідно зазначити, що дослідження за допомогою CFD-програм проводили для випадку, коли циклони працюють на лінії всмоктування.

Результати досліджень та їх обговорення. З метою оптимізації конструкції циклону із спіральним напрямним апаратом досліджено вплив кількості витків, ширини каналів на ефективність роботи, а висоти центральної випускної труби – на ефективність роботи і гідравлічний опір циклону із спіральним апаратом. Дослідження циклону зі спіральним направляючим апаратом для визначення впливу числа витків, ширини каналів апарату на гідравлічний опір приведено в [7]. Також було визначено ефективність очищення повітря оптимізованої конструкції апарату від пилу, який утворюється під час різних процесів механічної обробки матеріалів.

Вплив кількості витків і ширини каналів на ефективність роботи циклону На рис. 1 і 2 наведено залежності ефективності очищення від кількості витків і різної ширини спірального каналу за різних значень фіктивної швидкості (витрат газу).

Як видно з рис. 1 і рис. 2, ширина каналу менше впливає на ефективність сепарації, ніж кількість витків. Найбільшої ефективності досягають, коли ширина каналу є найменшою. Це зрозуміло, тому що частинки пилу, які мають найгірші умови сепарації, тобто входять в апарат біля центральної випускної труби, проходять у цьому випадку найменшу відстань сепарації порівняно з іншими величинами ширини каналу. Проте апарати з малою шириною каналу мають невелику продуктивність. Достатньо високу ефективність очищення мають апарати із шириною каналу 60 мм.

Згідно з рис. 2, збільшення кількості витків збільшує ефективність сепарації, яка досягає максимуму при чотирьох витках. Це можна пояснити тим, що збільшується час перебування частинок пилу в апараті. Подальше збільшення кількості витків приводить до зменшення ефективності. Очевидно, що газовий потік із зовнішнього витка під час переходу із низхідного потоку у висхідний в кінцевій частині апарату захоплює частинки пилу, які досягли стінок внутрішніх витків циліндричної частини, і осідають в бункер. Крім того, збільшення кількості витків приводить до зростання гідравлічного опору [7].

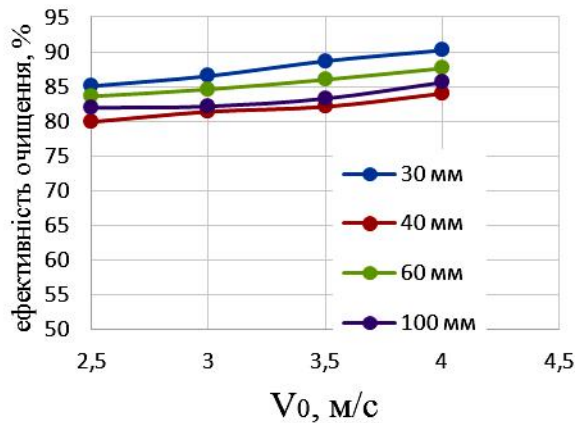


Рис. 1. Залежність ефективності очищення від фіктивної швидкості за різних значень ширини вхідного патрубка (кількість витків для всіх апаратів дорівнює 2)

Fig. 1. Dependence of cleaning efficiency on fictitious speed at the different values of width of inlet nozzle (the amount of coils for all apparatus equals 2)

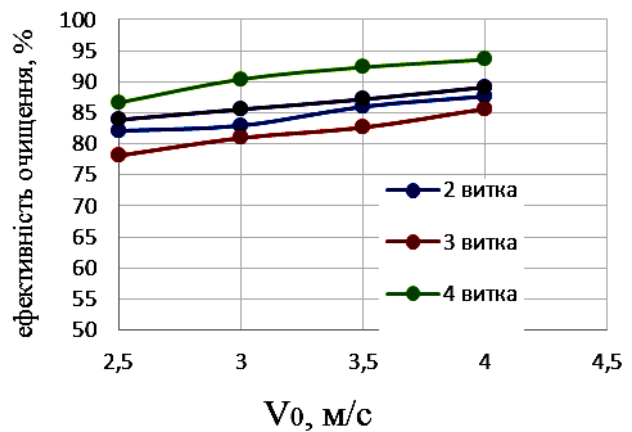


Рис. 2. Залежність ефективності очищення від фіктивної швидкості за різних значень кількості витків (ширина вхідного патрубка для всіх апаратів дорівнює 60 мм)

Fig. 2. Dependence of cleaning efficiency on fictitious speed at the different values of number of coils (the width of inlet nozzle for all apparatus equals 60 mm)

Отже, можна вважати, що для циклону із спіральним напрямним апаратом оптимальною є кількість витків 2–4, а ширина каналу – 60 мм.

Визначення впливу висоти центральної труби на основні характеристики циклону. Також було вивчено вплив висоти центральної труби на гідравлічний опір і ефективність очищення циклону[8].

Під час досліджень значення висоти центральної труби змінювали відносно циліндричної частини циклону. Її змінювали в межах від 540 мм вище нижнього торця циліндричної частини до 500 мм нижче цього торця (рис. 3).

На графіках (рис. 4, 5) за нульове значення висоти центральної труби відносно циліндричної частини прийнято випадок, коли висота центральної труби і циліндричної частини є однакові. Від'ємні значення показують, наскільки висота центральної труби в абсолютних значеннях є меншою від висоти циліндричної частини, а додатні – навпаки. Верхня межа висоти центральної труби зумовлена тим, що подальше зменшення висоти приведе до зміни верхньої спіральної кришки циклону і, відповідно, до ускладнення конструкції апарату. Збільшення нижньої межі висоти центральної труби недоцільно, оскільки це приведе до виносу в центральну трубу пристінного пилу в конічній частині.

На рис. 4 представлено зміну гідравлічного опору апарату (ΔP) від висоти центральної труби відносно циліндричної частини. Як видно з рис.4, гідравлічний опір має складний характер зміни, із збільшенням висоти центральної труби до рівня, коли нижній край центральної труби збігається із нижнім краєм циліндричної частини, гідравлічний опір апарату зростає. Подальше збільшення висоти до рівня, коли нижній край центральної труби нижче нижнього краю циліндричної частини на 250 мм, приводить до зменшення гідравлічного опору. Коли висоту центральної труби далі збільшувати, то гідравлічний опір знову зростає. Гідравлічний опір апарату при крайніх значеннях досліджених висот приблизно однаковий.

Висота центральної труби також впливає на ефективність очищення. Зміну ефективності очищення від висоти центральної труби наведено на рис. 5.

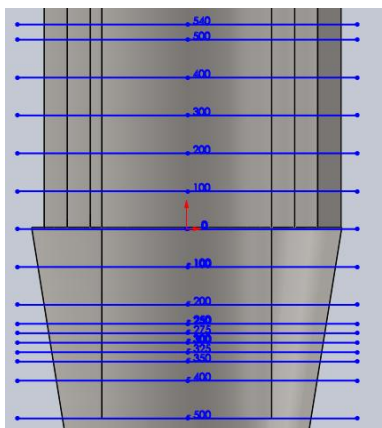


Рис. 3. Значення висот центральної труби відносно висоти циліндричної частини

Fig. 3. Values of heights of central pipe in relation to the height of cylindrical part



Рис. 4. Вплив висоти центральної труби на гідравлічний опір

Fig. 4. Influence of height of central pipe on hydraulic resistance



Рис. 5. Вплив висоти центральної труби на ефективність очищення

Fig. 5. Influence of height of central pipe on efficiency of cleaning

Як видно з рис. 5, найбільшої ефективності досягають, коли висота центральної випускної труби знаходиться в межах від 0 до 200 мм вище нижнього торця циліндричної частини. Подальше збільшення висоти центральної труби приводить до суттєвого зменшення ефективності очищення.

Прогнозування ефективності роботи циклону. Для прогнозування ефективності очищення циклону в певних конкретних умовах необхідно мати фракційні коефіцієнти очищення відповідного пилу. На рис. 6 показано зміну фракційного коефіцієнта очищення залежно від діаметра фракції частинок пилу (в нашому випадку пилу КП – 3) для оптимізованої конструкції (апарат з високим коефіцієнтом ефективності очищення і низьким гідравлічним опором) циклону із спіральним напрямним апаратом.

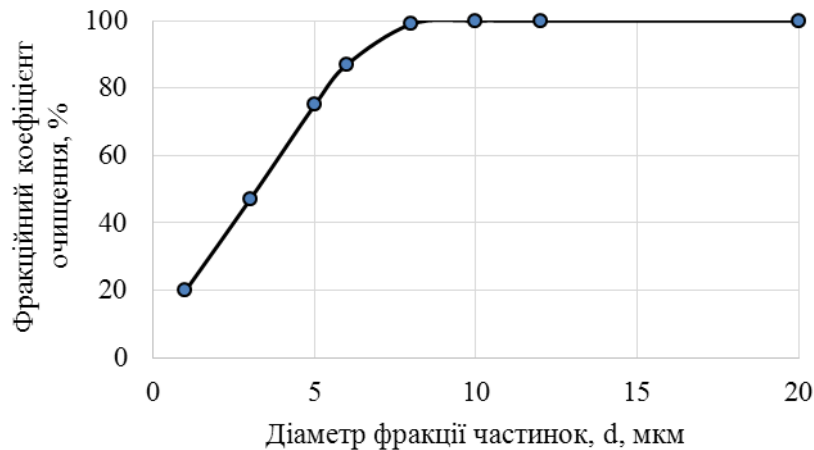


Рис. 6. Графік фракційної ефективності циклону із спіральним напрямним апаратом

Fig. 6. Graph of factious efficiency of cyclone with a spiral directing apparatus

Залежність на рис. 6 показує, що діаметр частинок, які вловлюються, на 50 % становить $d_{50} \approx 3,2$ мкм. Для умов, приведених в [9, 10] (фіктивна швидкість газу – 3,5 м/с, густина частинок пилу 1930 кг/м³, в'язкість газового середовища $22,2 \cdot 10^{-6}$ Па·С), $d_{50} \approx 4,06$ мкм. Для апаратів, наприклад, циклону ЦН15 $d_{50} = 4,5$ мкм, циклону ЦН–11 – $d_{50} = 3,65$ мкм [9, 10]. Крім того, з рис. 6 видно, що частинки пилу розміром понад 10 мкм ефективно вловлюються апаратом.

Якщо вважати, що фракційний склад пилу, який утворюється під час механічної обробки матеріалів, відповідає нормальному закону розподілу, то значення ефективності очищення для пиловловлюючого апарату можна обчислити за формулою (1) за визначеними за допомогою CFD-програм фракційним коефіцієнтам ефективності.

У таблиці наведено характеристики пилу, який надходить в атмосферу від ділянок механічної обробки матеріалів [1], а також за допомогою CFD-програм спрогнозовано ефективність його вловлення за допомогою циклону із спіральним напрямним апаратом.

Характеристики пилу, який виділяється в процесах абразивної обробки металів у механічних цехах

Characteristics of dust that emitted in the processes of abrasive machining of metals in machine-shops

Процес обробки	Вид пилу	Концентрація пилу, г/м ³	Медіанний діаметр частинок пилу, мкм	Густина частинок пилу, г/см ³	Прогнозована ефективність очищення, %
Зачищення деталей наждаком	Абразивний + металічний	0,2–0,5	44–60	3,4–4,8	99,6–99,9
Заточування	Металічний + окалина	0,1–0,4	14–60	3,4–4,8	99,5–99,9
Шліфування	Абразивний + металічний	0,5–1,0	19–35	3,4–4,8	99,5–99,8
Полірування	Абразивний + текстильний + пил полірувальної пасти	0,9–1,1	40–240	1,5	95,8–97,5

Наведені в таблиці результати досліджень оптимізованої конструкції циклону із спіральним направляючим апаратом свідчать про те, що прогнозована ефективність апарату очищення повітря від пилу, який утворюється в процесі механічної обробки, є достатньо високою. Це означає, що досліджуваний циклон можна застосовувати на дільницях абразивної обробки для вловлення пилу.

Висновки. Отже, за допомогою CFD-програм, знаючи вид пилу, який надходитиме в пиловловлюючий апарат, а також його гранулометричний склад, можна прогнозувати ефективність очищення і, відповідно, оптимізувати конструкцію пиловловлюючих апаратів сухого очищення. Результати досліджень можна широко застосовувати для створення високоефективного пиловловлюючого обладнання.

1. Тищенко Н. Ф. Охрана атмосферного воздуха. Расчет содержания вредных веществ и их распределение в воздухе: справ. изд. – М.: Химия, 1991. – 368 с., ил.;

2. Семенюк М. В. Патент на корисну модель UA 111538 U “Дворівневий відцентровий фільтр” / С. В. Плашихін, М. В. Семенюк // Номер заявки и 2016 05634, дата подання заявки: 25.05.2016, дата, з якої є чинними права на корисну модель: 10.11.2016, публікація відомостей про видачу патенту: 10.11.2016, бюлетень № 21.

3. Семенюк М. В. Очищення газових потоків у відцентрових фільтрах: дис. ... канд. тех. наук. 05.17.08. – Львів, 2018. – 215 с.

4. Дубинін А. І., Майструк В. В., Гаврилів Р. І., Циклони із спіральним направляючим апаратом. // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – Харків, 2011. – Вип. 2/6(50). – С. 35–37.

5. SolidWorks. Компьютерное моделирование в инженерной практике / А. А. Алямовский, А. А. Собачкин, Е. В. Одинцов, А. И. Харитонович, Н. Б. Пономарев. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 800 с.: ил.

6. Единая методика сравнительных испытаний пылеуловителей для очистки вентиляционного воздуха. – Л.: ВНИИОТ ВЦСПС, 1967. – 103 с.

7. Mastruk V. V., Gavryliv R. I., Mastruk I. M., Features of determination of geometrical sizes of cyclones with spiral sending vehicle and their influence are on hydraulic resistance // Вісник Національного університету “Львівська політехніка” Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні. – Львів, 2014. № 786. – С. 49–52.

8. Майструк В. В., Гаврилів Р. І., Майструк П. В. Визначення впливу геометричних розмірів елементів циклону із спіральним направляючим апаратом на ефективність його роботи// Тенденції та перспективи розвитку науки і освіти в умовах глобалізації. Матеріали науково-практичної інтернет-конференції 28 лютого 2019 р. – Переяслав-Хмельницький. – Вип. 44. – С. 579–583.

9. Старк С. Б. Пылеулавливание и очистка газов в металлургии. – М.: Металлургия, 1977. – 328 с.

10. Ужов В. Н., Вальдберг А. Ю., Мяков Б. И., Решидов И. К. Очистка промышленных газов от пыли. – М.: Химия, 1981. – 392 с., ил.

V. V. Mastruk, R. I. Havryliv
Lviv Polytechnic National University

DESIGN OPTIMISATION AND PROGNOSTICATION OF CLEANING EFFICIENCY OF CYCLONE WITH SPIRAL DIRECTING APPARATUS

© Mastruk V. V., Havryliv R. I., 2019

Goal. Stated problem in scientific article could be solved by computer modeling of gas stream motion in working area using CFD – programs. Knowledge about structure of gas stream and the trajectory of motion of dust particles afford us to evaluate the efficiency of its work and optimize the design of apparatus. **Significance** of work consists in evaluation of efficiency of work of cleaning apparatus using CFD – programs. Experiments that is conducted using CFD – programs considerably accelerate the process of researches and are cheaper. **Methodology** consists on determining the trajectory of motion of certain parts of one fraction from the conditions of entrance in an apparatus. Particles, which trajectory reached the walls of cylindrical or conical part of apparatus corps, is considered to be “captured”. The particles, which trajectory reached the top butt of inlet nozzle, is considered to be “carried”.

The ratio of the “captured” and “carried” particles determines the factious efficiency of apparatus. **Results.** The article optimizes design of the cyclone with a spiral directing apparatus and determines the efficiency of its work. **Scientific novelty.** There is suggested for first time to determine the efficiency of work of cleaning apparatus by CFD – programs, using the dependence of the trajectories of motion of dust particles from the conditions of entrance in an apparatus. **Practical significance.** Using CFD – programs afford us to predict cleaning efficiency and optimize the design of cleaning apparatus of the dry cleaning. The obtained results make it possible to create of high-efficiency cleaning equipment.

Key words: cyclone, spiral directing apparatus, hydraulic resistance, cleaning efficiency, CFD – programs.

1. Tishchenko N. F. *Okhrana atmosfernogo vozdukha. Raschet sodержaniya vrednykh veshchestv i ikh raspredeleniye v vozdukhe. Sprav. Izd.* – M.: Khimiya, 1991. – 368 s., il.
2. Semenyuk M.V. Patent na korysnu model' UA 111538 U “Dvorivnevyy vidtsentrovyy fil'tr” / Plashykhin S. V., Semenyuk M. V. // Nomer zayavky u 2016 05634, data podannya zayavky: 25.05.2016, data, z yakoyi ye chynnymy prava na korysnu modele: 10.11.2016, publikatsiya vidomostey pro vydachu patentu: 10.11.2016, byuleten. – No. 21.
3. Semenyuk M. V. *Ochyshchennya hazovykh potokiv u vidtsentrovyykh fil'trakh: dys....kand. tekhn. nauk.* 05.17.08. – L'viv, 2018. – 215 s.
4. Dubynin A. I., Maystruk V. V., Havryliv R. I., Tsyklony iz spiral'nym napravlyayuchym aparatom. // *Vostochno-Evropeysky zhurnal peredovykh tekhnolohiy.* Kharkiv, 2011 vyp. 2/6(50). S. 35–37.
5. SolidWorks. *Komp'yuternoye modelirovaniye v inzhenernoy praktike* / Alyamovskiy A. A., Sobachkin A. A., Odintsov Ye. V., Kharitonovich A. I., Ponomarev N. B. – SPb.: BKHV-Peterburg, 2005. – 800 s.: il.
6. *Yedinaya metodika sravnitel'nykh ispytaniy pyleuloviteley dlya ochistki ventilyatsionnogo vozdukha.* – L.: VNIOT VTSSPS, 1967. – 103 s.
7. Maystruk V. V., Gavryliv R. I., Maystruk I. M., *Fatures of determination of geometrical sizes of cyclones with spiral sending vehicle and their influence are on hydraulic resistance* // *Visnyk Natsional'noho universytetu “L'vivs'ka politekhnikha” Optymizatsiya vyrobnychyykh protsesiv i tekhnichnyy kontrol' u mashynobuduvanni ta pryladobuduvanni № 786 Vydavnytstvo L'vivs'koyi politekhniki.* – L'viv, 2014. – S. 49–52.
8. Maystruk V. V., Havryliv R. I., Maystruk P. V. *Vyznachennya vplyvu heometrychnyykh rozmiriv elementiv tsyklonu iz spiral'nym napravlyayuchym aparatom na efektyvnist' yoho roboty*// *Tendentsiyi ta perspektyvy rozvytku nauky i osvity v umovakh hlobalizatsiyi. Vypusk 44: Materialy naukovo-praktychnoyi internet-konferentsiyi 28 lyutoho 2019 r., Pereyaslav-Khmel'nyts'kyy.* – S. 579–583.
9. Stark S. B. *Pyleulavlvaniye i ochistka gazov v metallurgii.* – M.: Metallurgiya, 1977. – 328 s.
10. Uzhov V. N., Val'dberg A. Yu., Myagkov B. I., Reshidov I. K. *Ochistka promyshlennykh gazov ot pyli.* – M.: Khimiya, 1981. – 392 s., il.